

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Bakalářská práce

Spalování paliv v experimentálním spalovacím zařízení
s fluidní vrstvou

Fuels Combustion in Experimental Device with
Fluidized Bed

Student:

Daniel Stix

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Marek Jadlovec

Ostrava

Zadání bakalářské práce

Student: **Daniel Stix**
Studijní program: **B2341 Strojrenství**
Studijní obor: **3907R009 Provoz energetických zařízení**
Téma: **Spalování paliv v experimentálním spalovacím zařízení s fluidní vrstvou**
Fuels Combustion in Experimental Device with Fluidized Bed
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

Práce se zaměřuje na princip spalování paliv ve stacionární fluidní vrstvě; stechiometrický výpočet spalovacích reakcí a ověření těchto výpočtu na reálném experimentálním spalovacím zařízení.

Požadavky jsou následující:

1. Vypracujte rešerši z oblasti spalovacích zařízení, zaměřenou převážně na spalování paliv ve stacionární fluidní vrstvě
2. Nakreslete schématický výkres experimentálního spalovacího zařízení s fluidní vrstvou
3. U vybraného typu paliva proveďte stechiometrický výpočet spalovacích reakcí
4. U vybraného paliva ověřte stechiometrický výpočet spalovacích reakcí na reálném experimentálním spalovacím zařízení

Seznam doporučené odborné literatury:


ČECH, Bohumír. *Fluidní spalovací zařízení v energetice: teze habilitační přednášky*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2011. ISBN 978-80-248-2490-1.
NOSKIEVIČ, Pavel. *Spalování uhlí*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1993. ISBN 80-7078-197-1.
ROBL, Thomas L., Anne OBERLINK a Rod JONES, ed. *Coal combustion products (CCP's): characteristics, utilization and beneficiation*. Duxford: Elsevier/Woodhead Publishing, [2017]. Woodhead series in energy. ISBN 978-0-08-100945-1.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Jadlovec**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.
vedoucí katedry

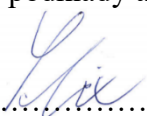



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě18.5.2020.....

..........

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, że Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TOU.
- bylo sjednáno, že VŠB-TOU, v případě zájmu z její strany, uzavře licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 15 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TOU, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TOU na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jméno a příjmení autora práce:

Daniel Stix

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Pustějov 63, Pustějov

V Ostravě 18.5.2020

.....


podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

STIX, D. Spalování paliv v experimentálním spalovacím zařízení s fluidní vrstvou: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2020, 49 s. Vedoucí práce: JADLOVEC, M.

Bakalářská práce se zabývá spalováním paliv ve spalovacích zařízeních s fluidní vrstvou. V úvodu je popsána fluidní vrstva, typy fluidních vrstev, výhody a nevýhody fluidního spalování. V další části jsou popsána měřidla a zařízení potřebná k stanovení jednotlivých tepelně – technických parametrů u energetických zařízení. Na základě těchto studií je v praktické části proveden stechiometrický výpočet spalování. Následně proveden experiment na laboratorním zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

- Fluidace
- Fluidní kotel
- Diagnostické měření

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

STIX, D. Fuels combustion in experimental device with fluidized bed: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2020, 49 p. Thesis head: JADLOVEC, M

Bachelor thesis is dealing with the combustion of fuels in experimental device with fluidized bed. The introduction section describes the fluidized bed, types of fluidized beds, advantages and disadvantages of combustion in devices with fluidized bed. The next section discusses the meters and the equipment needed to determine the individual thermal – technical parameters of energy equipment. Based on these studies, a stoichiometric calculation of combustion is performed in the practical part of the thesis. Subsequently, and experiment was conducted on laboratory equipment.

KEYWORDS

- Fluidization
- Fluidized bed boiler
- Diagnostic measurement

OBSAH BAKALAŘSKÉ PRÁCE

1.	Úvod	9
2.	FLUIDNÍ SPALOVÁNÍ	10
2.1	Fluidace	10
2.2	Fluidní vrstva	11
2.3	Typy fluidních vrstev	12
2.4	Teplota fluidní vrstvy	14
2.5	Spalování paliv ve fluidních ohništích	14
2.5.1	Spalování tuhých paliv	14
2.5.2	Spalování kapalných paliv	14
2.6	Rozdělení fluidních kotlů	15
2.6.1.	Fluidní kotle se stacionární fluidní vrstvou	15
2.6.2.	Fluidní kotle s expandující fluidní vrstvou	17
2.6.3.	Fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou	18
2.7	Výhody a nevýhody fluidního spalování	19
2.7.1	Výhody fluidního spalování	19
2.7.2	Nevýhody fluidního spalování	19
3.	Diagnosticke měření	19
3.1	Teplota	19
3.1.1	Termický odporový teploměr PT100	20
3.1.2	Termočlánky	21
3.1.3	Termovizní kamera	22
3.2	Tlak	23
3.2.1	Mikromanometr	23
3.2.2	U trubice	24
3.2.3	Prandtlova trubice	24
3.3	Průtok	25
3.3.1	Turbínové průtokoměry	25
3.3.2	Dýza ISA 1932	26
3.3.3	Klasická Venturiho trubice	27
4.	Výpočtová část	28
4.1	Charakteristika paliva	28
4.2	Přepočet stavů paliva	28

4.3	Stechiometrické výpočty pro spalování se vzduchem	29
4.4	Přepočet z normálního stavu na reálný stav	34
5.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	35
5.1	Popis laboratorního zařízení	35
5.2	Popis experimentu	36
5.3	Vyhodnocení experimentu	39
6.	ZÁVĚR	43
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	46
	SEZNAM OBRÁZKŮ	48
	SEZNAM TABULEK	48
	SEZNAM GRAFŮ	49
	SEZNAM PŘÍLOH	49

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

Značka	Veličina	Jednotka
T	Teplota	[K]
R	Odpor	[Ω]
p	Tlak	[Pa]
p_c	Celkový tlak	[Pa]
p_s	Statický tlak	[Pa]
W	Obsah vody	[–]
A	Obsah popeloviny	[–]
C	Obsah uhlíku	[–]
N	Obsah dusíku	[–]
H	Obsah vodíku	[–]
S	Obsah síry	[–]
O	Obsah kyslíku	[–]
V_{O_2}	Množství kyslíku pro spálení 1 kg paliva	[m_N^3/kg]
V_{vz}^S	Množství suchého vzduchu	[m_N^3/kg]
V_{vz}^v	Množství vlhkého vzduchu	[m_N^3/kg]
V_{sp}^S	Množství suchých spalin	[m_N^3/kg]
V_{sp}^v	Množství vlhkých spalin	[m_N^3/kg]
V_{H_2O}	Množství vodní páry ve spalinách	[m_N^3/kg]
X_{CO_2}	Měrný podíl oxidu uhličitého ve spalinách	[%]
X_{SO_2}	Měrný podíl oxidu siřičitého ve spalinách	[%]
X_{N_2}	Měrný podíl dusíku ve spalinách	[%]
X_{H_2O}	Měrný podíl vodní páry ve spalinách	[%]
X_{O_2}	Měrný podíl kyslíku ve spalinách	[%]

1. Úvod

Uhlí má zásadní roli při budování moderních a udržitelných společností. Je to základní zdroj pro řešení výzev, jímž čelí moderní svět. Hraje významnou úlohu při dodávce elektřiny po celém světě, je podstatné pro výrobu oceli a betonu. Těžba uhlí je také důležitá pro ekonomiku. V rozvojových zemích těžba uhlí poskytuje silnější růst ekonomiky a řešení problému chudoby.

V České republice má uhlí velký význam, protože je jediný tuzemský energetický zdroj, jehož zásoby jsou odhadovány v řádech milionů tun. I když energetická závislost České republiky v dnešní době klesá, stále se pohybuje kolem 60 % do zbylých 40 % spadá jaderná energie, případně energie z jiných zdrojů.

Spalovat uhlí je možné v práškových, roštových a fluidních kotlech. Základním měřítkem pro správný výběr optimálního kotle je granulometrie paliva. Právě fluidním spalováním se zabývá předložená bakalářská práce.

Cílem této práce je představit fluidní techniku, která je pravděpodobně velmi stará. S objevením kovářského měchu a hutnických procesů ve starověku a středověku měl člověk k dispozici stlačený vzduch, který různými experimenty dokázal využít pro různé účely. Poprvé byla fluidní technika popsána při třídění drcených zlatonosných rud. Pokusy o použitelnosti fluidní vrstvy pro spalovací účely se datují do období po 2. světové válce, která znamenala rychlý vývoj techniky včetně energetiky.

Teoretická část práce se zaměřuje na popis fluidizačního jevu, fluidní vrstvy, koncepci fluidních kotlů. V neposlední řadě se zabývá diagnostickým měřením v energetice sloužící pro určení jednotlivých tepelně – technických parametrů v provozu energetických zařízení v reálných podmínkách. Základní parametry v energetice jsou průtok, tlak a teplota.

Výpočetní část je zaměřena na stechiometrické výpočty spalování ke stanovení koncentrace jednotlivých složek spalin. Dále je zahrnuta charakteristika paliva využitého na jednotlivé výpočty a na experimentální část.

Experimentální část bakalářské práce se věnuje popisu experimentálního spalovacího zařízení, na kterém bylo prováděno měření. Schéma laboratorního zařízení bylo vytvořeno v programu AutoCAD 2019. Dále je popsán samotný průběh měření, ve kterém je detailně vysvětlen analyzační box TESTO 350. Analyzátor slouží pro měření koncentraci vybraných složek ve spalinách. V neposlední řadě jsou uvedena a vyhodnocena jednotlivá měření.

2. FLUIDNÍ SPALOVÁNÍ

Jedna z možných forem procesů výroby tepla nebo elektrické energie je spalování uhlí, biomasy, odpadů a dalších materiálů. S tímto přichází řada možností, jak tyto typy paliv spalovat. Jednou z možností jsou tzv. kotle s fluidní vrstvou. Tyhle typy kotlů pracují na principu fluidizačního media, která nadnáší pevné částice. Takle technologie je zcela jiná oproti kotlům roštovým. Uhlí a další typy paliv není, oproti kotli roštovému, podáváno po velkých částech. Je drceno na menší částice, které se proudem vzduchu neboli fluidizačním mediem pohybují směrem vzhůru, směřují se, nebo cirkulují, a co nejvýkonněji je využíván jejich energetický potenciál. [1] [3]

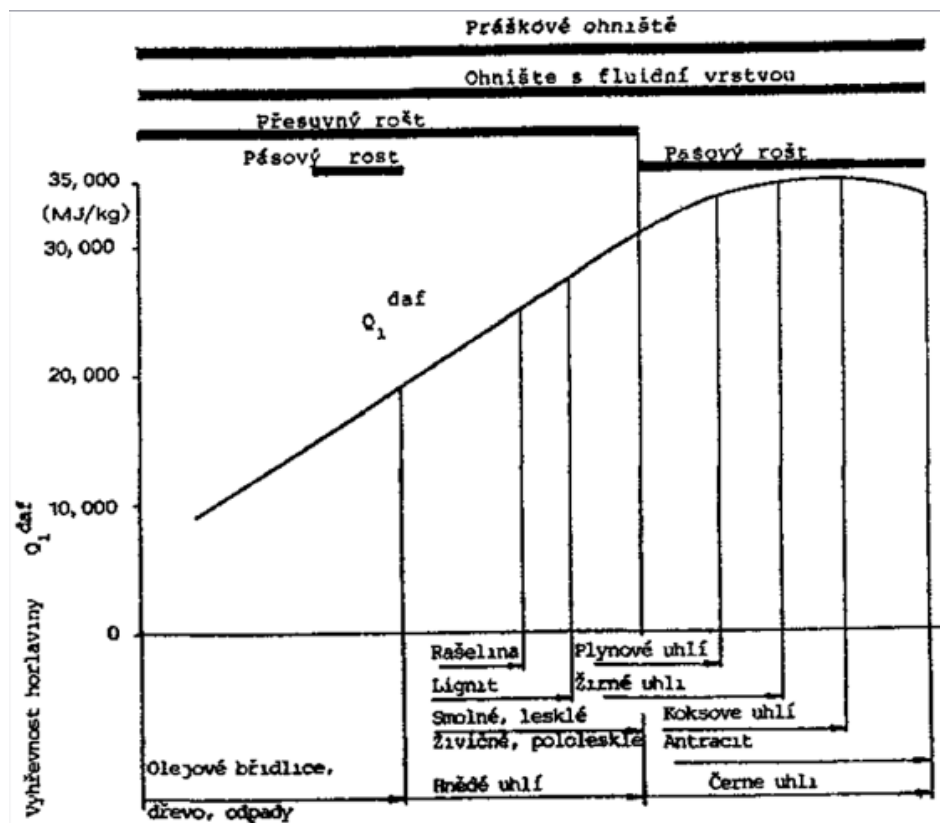
S unikátní aplikací technologie přišly v 50. a 60. letech firmy BASF a Lurgi, které vyvinuly zařízení s technologií tzv. cirkulující fluidní vrstvy z důvodu potřeby syntézy fluoridu hlinitého a kalcinace hydroxidu hlinitého. Vedle těchto mnoha různých forem katalytických procesů se začala cirkulující fluidní vrstva od 70. let používat ke spalování uhlí. Taktéž v této době začala fungovat jako tlakové zplyňování. [5]

V dnešní době kotle s technologií s fluidní vrstvou lze řadit do obvyklých zařízení ke spalování uhlí. V ČR bylo dosud konstruováno cca 30 velkých fluidních kotlů. Přesto je takle technologie doprovázená problematikou vypouštění CO_2 do ovzduší. [2] [6]

2.1 Fluidace

Fluidace je děj, při kterém tekutina proudící spolu s pevnými částicemi vytváří suspenzi, přičemž směr proudění je v opačném směru zemské tíže. Celý povrch pevných částic je v totálním styku s proudícím mediem, a tím dochází k intenzivnějšímu sdílení tepla. Děj probíhá tak, že materiál je dopravován do reaktoru ve formě nadrcených částic na tzv. fluidní rošt. Přes rošt je do tzv. fluidační komory následně přiváděno medium, které nejčastěji bývá vzduch. Částice jsou uvedeny do vznosu, kde se mezi sebou mísí, promíchávají a rozprostírají se po celém objemu reaktoru. Fluidace není pouze pojmem týkající se spalování uhlí, ale využívá se také u technologie sušení, třídění, pneumatické dopravě, či v chemických reaktorech při katalytické reakci. [7] [8] [10]

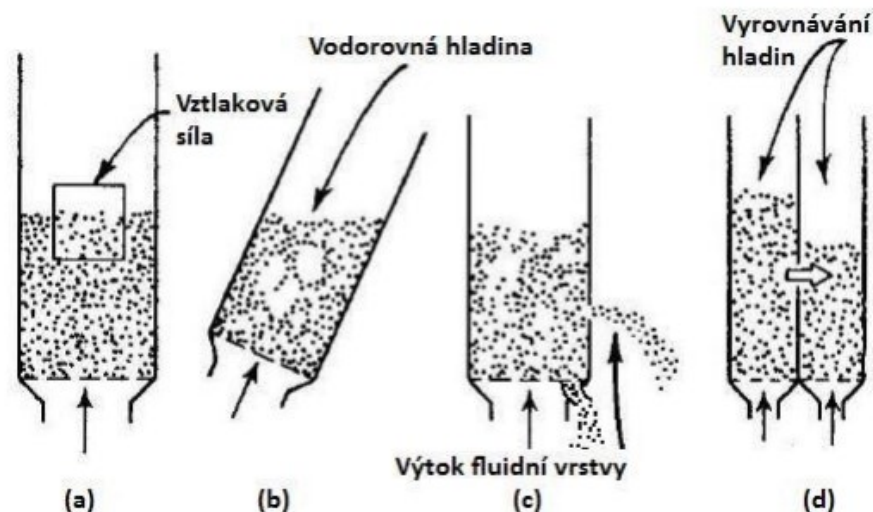
Jedním z důležitých faktorů při spalovacím procesu je granulometrie paliva u jednotlivých typů kotlů. Konstrukce kotlů bývá navržena podle spalovaného paliva. Fluidní kotle byly navrženy pro spalování paliva širokého rozsahu a granulometrie paliva cca do 50 mm. Práškový způsob spalování je z hlediska přípravy paliva nejnáročnější. Práškové kotle spalují uhelný prášek, který je rozemletý na velikost zrn pod 1 mm. Roštové ohniště slouží pro spalování kusových pevných paliv. [19] [20]



Obr. 1 Rozsah použitelnosti jednotlivých typů ohnišť [20]

2.2 Fluidní vrstva

Fluidní vrstva vzniká ve fluidační komoře, ve které jsou na porézní přepážce (roštu) dopravována vrstva pevných částic zrnitého materiálu. Přes přepážku proudí fluidační medium a s pevnými částicemi tvoří fluidní vrstvu. Základní vlastnost fluidní vrstvy je její pohyblivost, díky které se chová jako reálná kapalina. Povrch pevných částic je ve styku s proudícím médiem, a tím dochází k silnému přestupu tepla a hmoty. To je také hlavní důvod, proč se využívá spalování ve fluidní vrstvě. Tvar hladiny fluidní se blíží skutečné kapalině. Tedy fluidní vrstva má obdobné vlastnosti jako reálná kapalina (viz. Obr.2). Na tělesa potopená do fluidní vrstvy působí vztlaková síla (viz. Obr.2 (a)). Pokud bychom do fluidační vrstvy ponořili těleso, nepadne hned k zemi, ani se nezastaví o vrchní část fluidní vrstvy. Naopak se bude po fluidní vrstvě vznášet, jako by plavalo po vroucí mísici se kapalině. Tedy hladina fluidní vrstvy je vždy kolmá k tíhové síle, tudíž je vodorovná (viz. Obr.2 (b)). Při otevření otvoru do reaktoru začne medium tvořené z pevných částic z fluidační komory vytékat, díky hydrostatickému tlaku působícímu na stěny nádoby (viz. Obr.2.1 (c)). Při propojení více fluidních vrstev dochází k vyrovnání hladin (viz. Obr.2 (d)). [1] [9]



Obr. 2 Vlastnosti fluidní vrstvy s reálnou kapalinou [1]

2.3 Typy fluidních vrstev

Hlavním znakem fluidní vrstvy je kontakt mezi pevnými částicemi a protékajícím médiem. Mezi parametry, které ovlivňují fluidní vrstvy, patří rychlost a viskozita protékajícího média, výška a tvar fluidní vrstvy a konstrukce roštu. V praxi můžeme narazit na různé typy fluidních vrstev, které se dělí na rovnoměrné (viz. Obr.2 (a,b,c)) a nerovnoměrné (viz. Obr.2 (d,e,f,g,h)). [1]

Je-li médium přiváděno za velmi nízkého průtoku, kdy pouze prochází přes přepážku, pak hovoříme o nepohyblivé fluidní vrstvě (viz. Obr.2 (a)). Tedy médium nemá dostatečnou rychlost na to, aby uvedlo pevné částice zrnitého materiálu do vznosu. [1]

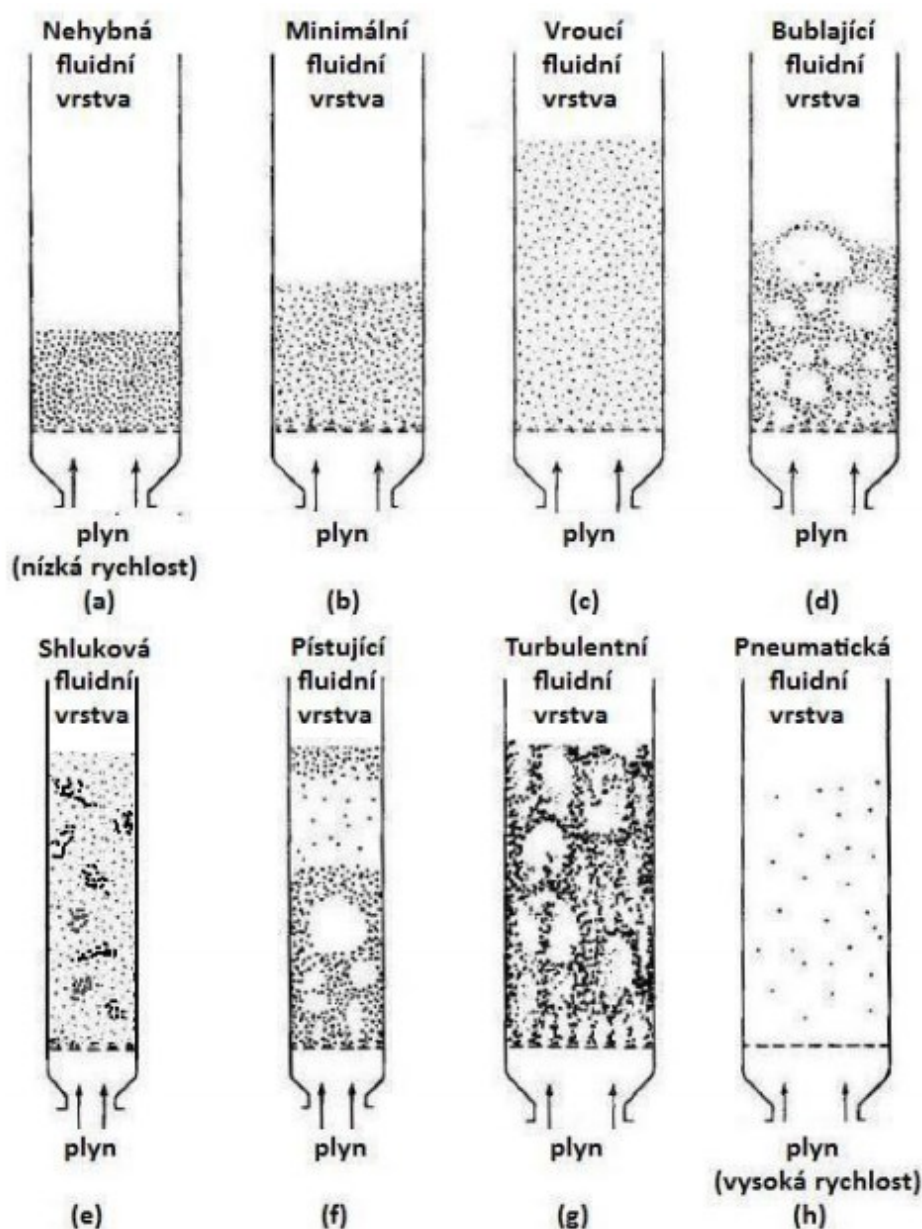
Při nárustu rychlosti průtoku média je dosaženo bodu, kdy jsou částice hromadně nadnášeny vzhůru proudem média. Tento vzniklý proces se označuje jako minimální fluidní vrstva (viz. Obr.2 (b)). [1]

Pro použití v praxi hlavně v energetice při spalování uhlí, se nejčastěji využívá vroucí vrstva (viz. Obr.2 (c)). Základní výhodou vroucí vrstvy je její klidná dobře měřitelná hladina, která svou podobou připomíná hladinu vroucí kapaliny. [1]

První z řad nerovnoměrných fluidních vrstev je bublající vrstva (viz. Obr.2 (d)), která je typická svými bublinami procházejícími vrstvou. Tyto bubliny mají nestejnoměrnou velikost, ale jejich průměr je menší než průměr fluidační komory. V praxi je takhle fluidní vrstva nežádoucí, jelikož nevzniká úplná reakce mezi pevnými částicemi a protékajícím médiem. [1]

Obr.2 (e) popisuje shlukovou fluidní vrstvu, která se vyznačuje malou, střední koncentrací částic. [1]

Dalším typem z nerovnoměrných fluidních vrstev je pístující fluidní vrstva (viz. Obr.2 (f)). Tato fluidní vrstva se spíše vyskytuje ve fluidačních komorách s malým průměrem a s vysokou výškou fluidní vrstvy. Řadí se mezi bublající fluidní vrstvy. Tvořící se bubliny ve spodní části komory postupně zvětšují svůj objem, někdy až na velikost průměru fluidační komory. V praxi je tento typ vrstvy nežádoucí a nebezpečný, kvůli vytváření silných vibrací, které mohou poškodit konstrukci. [1]



Obr. 3 Rozdělení fluidních vrstev [1]

Při navyšování vstupní rychlosti fluidačního média je dosaženo bodu, kde se fluidní vrstva stává turbulentní. (viz. Obr.2 (g)) [1]

Poslední typ fluidní vrstvy je pneumatická fluidní vrstva (viz. Obr.2 (h)), u které jsou dosaženy nejvyšší hodnoty rychlosti. Tyto rychlosti způsobují, že suspenze vznikla

z pevných částic a média jsou dopravována do cyklonového odlučovače, kde dochází k odloučení pevných částic, které dále putují zpátky do fluidní vrstvy. [1]

2.4 Teplota fluidní vrstvy

Pro ideálně probíhající reakci co nejúčinnějšího spalování částic je udržování teploty fluidní vrstvy ve velmi úzkých mezích, pohybujících se mezi $800 \div 950^{\circ}\text{C}$. Výše uvedené teplotní rozmezí je dáno možnostmi využití tzv. suché metody za pomoci drceného vápence. Tento typ aditiva se při spalování mění z formy CaCO_3 chemickou reakcí díky značné teplotě na CaO a CO_2 . Další aditiva využívaná ve fluidním spalování jsou pálené vápno CaO nebo dolomit $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$. Při překročení teploty nad 950°C se fluidní vrstva může začít tzv. zapékat, což je velmi nežádoucí jev zabraňující správné funkci, ale také může poškodit celé zařízení. Tento jev nastává vlivem měknutí popelovin díky vysoké teplotě, využívaný materiál se začne natavovat a vytvářet velké spékající se kusy, které jako nadnášené částice nemohou správně fungovat. [1] [11]

2.5 Spalování paliv ve fluidních ohništích

Fluidní kotle byly vyvinuty za účelem spalování paliv širokého rozsahu. Ve fluidní vrstvě je možno spalovat vzniklé odpady při těžbě černého uhlí, paliva s nižší výhřevností a vyšším obsahem popeloviny. Dále lze fluidním spalováním likvidovat komunální odpad nebo kapalný odpad. [18]

2.5.1 Spalování tuhých paliv

Do spalování tuhých paliv ve fluidních kotlích lze řadit hnědé uhlí, černé uhlí, pevný komunální odpad a různé druhy biomasy. Jednou z velkých výhod fluidního spalování je schopnost zpracovat méněhodnotná paliva, která by byla v jiném případě uložena na skládce. [18]

2.5.2 Spalování kapalných paliv

Fluidní ohniště jsou univerzální zařízení, ve kterých je možné velmi kvalitně spalovat kapalná paliva nebo pouze likvidovat odpady různého druhu. Tato paliva jsou většinou značně znečištěná a mají velkou viskozitu, takže je nelze zpracovat v obvyklých hořácích. Využití techniky fluidního spalování je velmi účelné u viskózních dehtů a mazutových zbytků. Kapalné odpady mohou být spalovány ve fluidních ohništích, které dokážou spálit odpady s obsahem vody do 80% a to bez použití dalšího stabilizačního paliva. Velkou výhodou fluidní technologie spalování je likvidace organických sloučenin, které nelze spalovat jiným způsobem. Do této skupiny lze řadit různé organické jedy, kyanidy a fenoly. [18]

2.6 Rozdělení fluidních kotlů

Konstrukční provedení fluidních kotlů úzce závisí na účelu, za jakým byl daný kotel realizován. První možné rozdělení z hlediska charakteristiky fluidní vrstvy je fluidní kotel se stacionární fluidní vrstvou, s expandující fluidní vrstvou a s cirkulující fluidní vrstvou. Dále lze rozdělit fluidní kotle dle teplotní úrovně, kdy dělíme kotle na škvárující fluidní vrstvu a neškvárující fluidní vrstvu. Dělicím bodem mezi těmito fluidními vrstvami je hodnota cca 1000°C. [2]

2.6.1. Fluidní kotle se stacionární fluidní vrstvou

Kotle se stacionární fluidní vrstvou jsou také někdy nazývány jako bublinkující. Tenhle typ je charakterizován svou zřetelnou hladinou a vysokým úletem pevných částic z fluidní vrstvy, které jsou odstraňovány do předem určených zásobníků nebo se vracejí zpět do fluidní vrstvy. Kotle se stacionární fluidní vrstvou mohou pracovat ve spalovacím režimu nebo zplyňovacím režimu. Dělicí bod mezi oběma procesy je součinitel přebytku vzduchu α . [2]

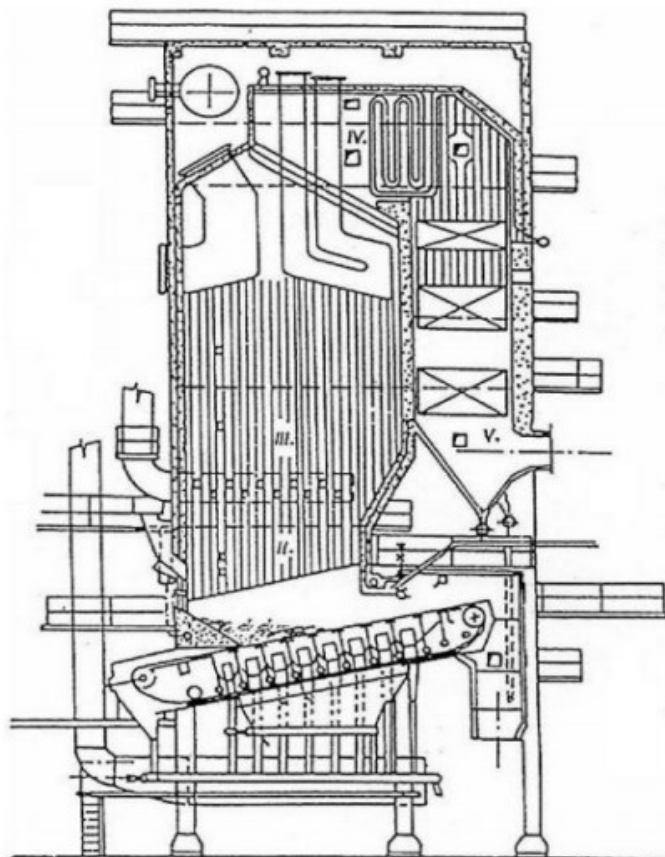
Při spalovacím režimu je přebytkem vzduchu $\alpha > 1$ a fluidní vrstva je tvořena z 95 – 98 % částicemi inertu a pouze 2 – 5 % palivem. Teplota fluidní vrstvy je regulována do intervalu 850 ÷ 900 °C z důvodu natavování povrchu inertních částic. Regulace je zajištěna odvodem tepla teplosměnnými plochami, které jsou uloženy uvnitř fluidní vrstvy. [2]

U zplyňovacího režimu se používá přebytek vzduchu $\alpha < 1$. Tenhle typ fluidní vrstvy je tvořen z 80 % inertním materiálem a z 20 % částicemi paliva. Regulace spalovací teploty je zajištěna množstvím fluidního vzduchu. Při zplyňovacím procesu se z fluidní vrstvy uvolňují plyny (hlavně CO), které vzájemně se sekundárním vzduchem jsou spalovány ve II. stupni kotle. [2]

Kotel se škvárující fluidní vrstvou je posledním typem u kotlů se stacionární fluidní vrstvou. V České republice tenhle typ kotle můžeme najít pod názvem IGNIFLUID (viz Obr. 2.3). Pro tento druh kotle se používají velmi kvalitní druhy uhlí. Částice paliva se používají o velikosti zrna 20 mm, které vcházejí do fluidní vrstvy o teplotě v intervalu 1100 – 1200°C a s přebytkem primárního vzduchu $\alpha < 1$. Sekundární vzduch se zde používá pro dohořívání plyných složek paliva při teplotě 1200 – 1300°C. Některé částice se vlivem vysoké teploty spečou a vlivem gravitační síly dopadají dolů na rošt, kde jsou pásovým dopravníkem vynášeny ven z kotle. Jednou z výhod těchto kotlů je mnohahodinové odstavení kotle do rezervy, ale naopak účinnost spalování není velmi příznivá. [2]

S postupným využíváním kotlů se stacionární fluidní vrstvou v praxi bylo zjištěno, že spalování paliva nese s sebou mnoho nevýhod, do nichž se zejména řadí vyšší tvorba emisí

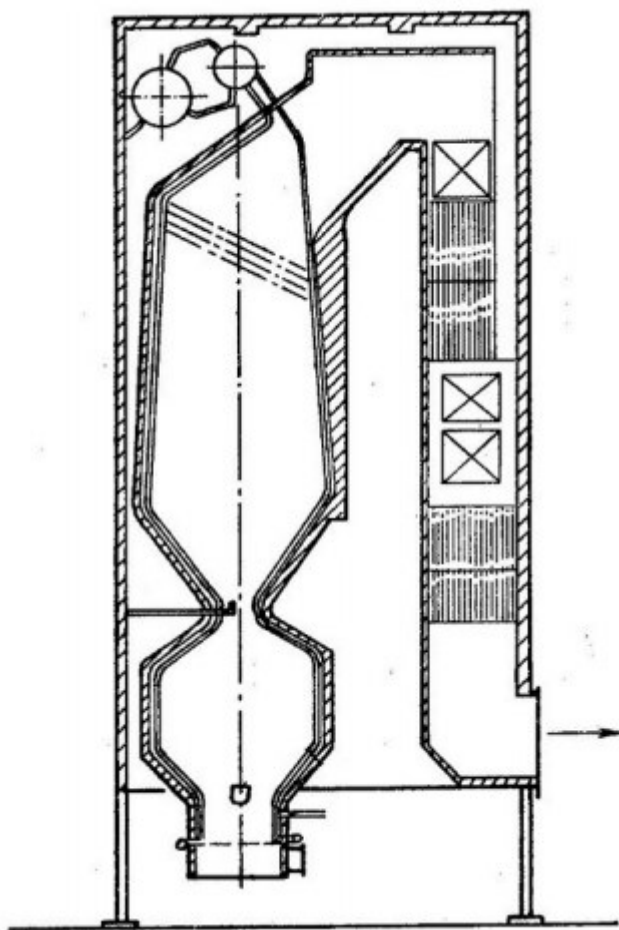
CO, velký úlet pevných částic z fluidní vrstvy, nespolehlivá regulace teploty fluidní vrstvy.
[2]



Obrázek 4 Fluidní kotel typu IGNIFLUID [2]

2.6.2. Fluidní kotle s expandující fluidní vrstvou

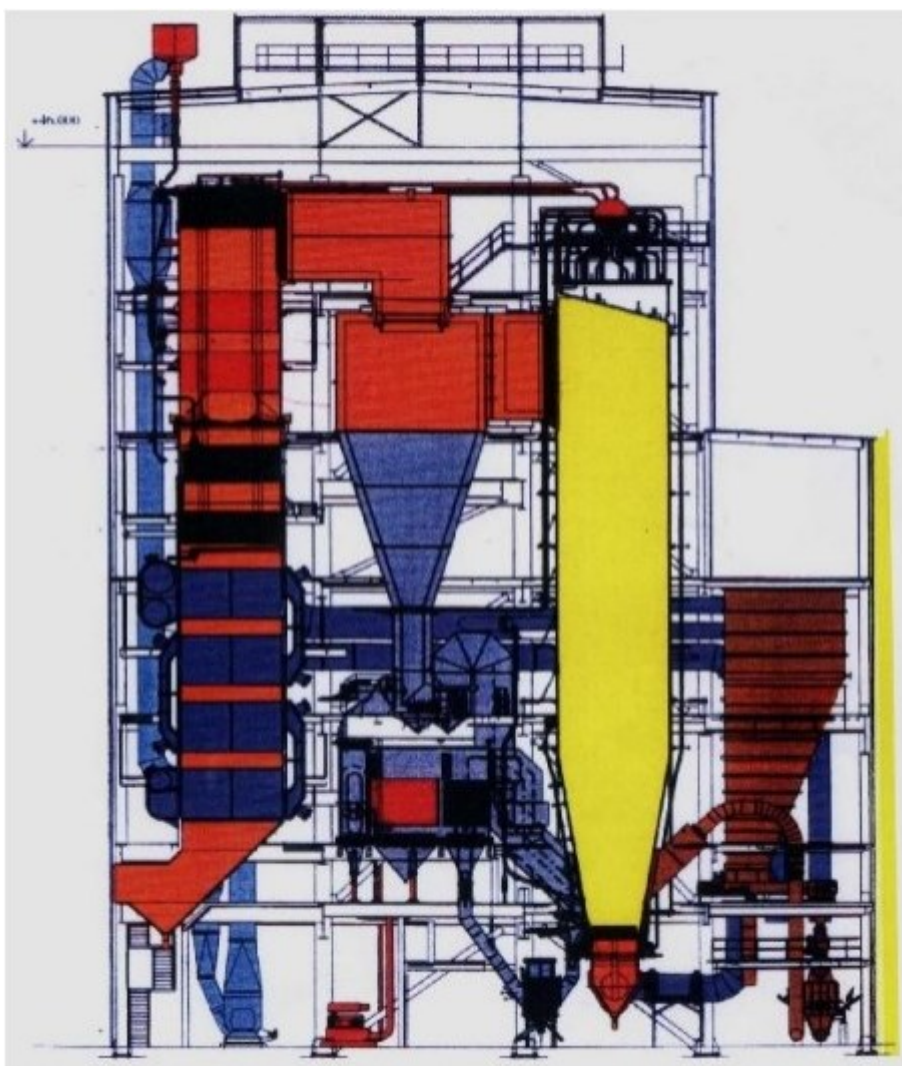
Expandující fluidní vrstva se vyznačuje její cirkulací mezi roštem a koncem ohniště. To znamená, že veškerá cirkulace se koná vně fluidní komory, proto dostaly tyto kotle označení tzv. kotle s vnitřní cirkulací. V České republice se tento typ objevuje pod názvem DUKLAFLUID. Koncepčně je navrhnuto do dvou typů dvoustupňového fluidního ohniště. V prvním případě se jedná o fluidní ohniště, které je připojeno bočně ke spalovací komoře. V dalším případě je fluidní zplyňovací reaktor umístěn ve spodní části a až nad ním je usazena spalovací komora. Komory jsou od sebe děleny zúženým prostorem. Jednou z velkých výhod kotlů DUKLAFLUID je možnost spalování uhlí s nízkou výhřevností (od 5 MJ/kg) a vyšším obsahem popelovin. Další výhodou tohoto systému je spalování hlušiny a kapalných odpadů. [2]



Obr. 5 Fluidní kotel typu DUKLAFLUID [2]

2.6.3. Fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou

Fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou se vyznačuje cyklonovými odlučovači, ve kterých dochází k odloučení těžkých částic a návratu zpět do spalovací komory. Cirkulace se pohybuje mezi 10 až 15 cykly a tím je zajištěno lepší prohoření paliva a snižuje se mechanický nedopal. Cirkulující fluidní vrstvy pracují při vyšších rychlostech fluidace a není zde pevně stanovena hladina fluidní vrstvy. Spalované palivo má menší granulometrii než u předešlých typů fluidních vrstev. Díky cirkulaci částic je tato metoda spalování vysoce účinná, kvůli dlouhému setrvání částic ve fluidní vrstvě. Jedna z mnoha výhod u kotlů s cirkulující fluidní vrstvou je možnost využití suché aditivní metody odsíření spalín přímo ve fluidním loži. [12] [2]



Obr. 6 Cirkulující kotel K12 v ENERGETICE Třinec [2]

2.7 Výhody a nevýhody fluidního spalování

Jako každé jiné technologie spalování tak i fluidní má své výhody a nevýhody. [2]

2.7.1 Výhody fluidního spalování

- lze spalovat různé druhy paliv,
- vhodné ohniště pro paliva s vysokým obsahem popelovin,
- možnost spalování vlhkých paliv a více druhu paliv najednou,
- nízká a dobře regulující spalovací teplota $600 \div 900^{\circ}\text{C}$,
- přímé odsiřování ve fluidní vrstvě uhličitanelem vápenatým,
- vysoká účinnost spalování,
- konstrukční jednoduchost zařízení. [2]

2.7.2 Nevýhody fluidního spalování

- vysoká spotřeba fluidizačního média,
- vysoké množství úletu málo hmotných částic,
- zařízení je složitější na údržbu než u jiných typů kotlů
- vyšší investiční náklady než u granulačních kotlů
- vysoké opotřebení stěn fluidní komory díky abrazivním účinkům pevných částic.[2]

3. Diagnostické měření

Pro určení jednotlivých tepelně – technických parametrů v provozu energetických zařízení v reálných podmínkách, lze využít mnoho typů diagnostických měření. Diagnostická měření jsou využívána k získání potřebných hodnot, které lze dále využít při výpočtech potřebných pro hodnocení garantovaných parametrů. Základní parametry v energetice jsou teplota, tlak a průtok. [14]

3.1 Teplota

Teplota patří mezi stavové veličiny a je mírou velikosti neuspořádaného pohybu molekul. Teplotu není možné přímo měřit. Určuje se podle změn fyzikálních vlastností dané látky, která se určitým způsobem dotýká tělesa, ve kterém lze teplotu měřit.

Metody měření můžeme rozdělit na:

- měření dotykovými teploměry,
- měření bezdotykovými teploměry,

- měření speciálními metodami. [14]

Nejčastěji používaná teplotní stupnice se nazývá Celsiova stupnice, která je určena teplotou tání ledu ve vodě o tlaku $101\,325\text{ Pa}$ ($t = 0\text{ °C}$) a teplotou varu vody při stejném tlaku ($t = 100\text{ °C}$). Interval je ohraničen a rozdělen na 100 stejných dílů. [14]

Další velmi známá stupnice je Kelvinova stupnice. Dělení má stejné jako Celsiova stupnice, avšak $0\text{ K} = 273,15\text{ °C}$, což je nejnižší možná teplota (absolutní nulový bod), při které se atomy v látce přestávají pohybovat. [14]

Vztah pro přepočet z Celsiovy stupnice do Kelvinovy stupnice zní:

$$T = t + 273,15 \quad [K] \quad (3.1)$$

3.1.1 Termický odporový teploměr PT100

Odporové teploměry jsou snímače teploty, které pracují na principu změny odporů kovů v závislosti na teplotě. U termických odporových teploměrů se využívá slabá platinová vrstva nanesená na keramickém nosiči. Při teplotě 0 °C je jmenovitý odpor těchto měřicích komponentů 100 Ohmů . Odporové senzory teploty se využívají pro velmi přesné měření teploty v rozmezí přibližně -200 až 600 °C . [16] [15]



Obr. 7 Odporový teploměr PT100 [15]

Interpretace naměřených hodnot

U teploty 0 °C je jmenovitý odpor odporového teploměru PT100 100 Ohmů.

Vzorec na výpočet hodnoty odporu při libovolné teplotě (t):

$$R(t) = 100 + 0,39083 \cdot t - 5,775 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 \quad [\Omega] \quad (3.2)$$

Příklad:

Naměřená teplota: $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$R(t) = 100 + 0,39083 \cdot 20 - 5,775 \cdot 10^{-5} \cdot 20^2 = 107,7935 \Omega$$

Při teplotě 20 °C má odporový teploměr PT100 odpor přibližně 107,8 Ohmů. [16]

3.1.2 Termočlánky

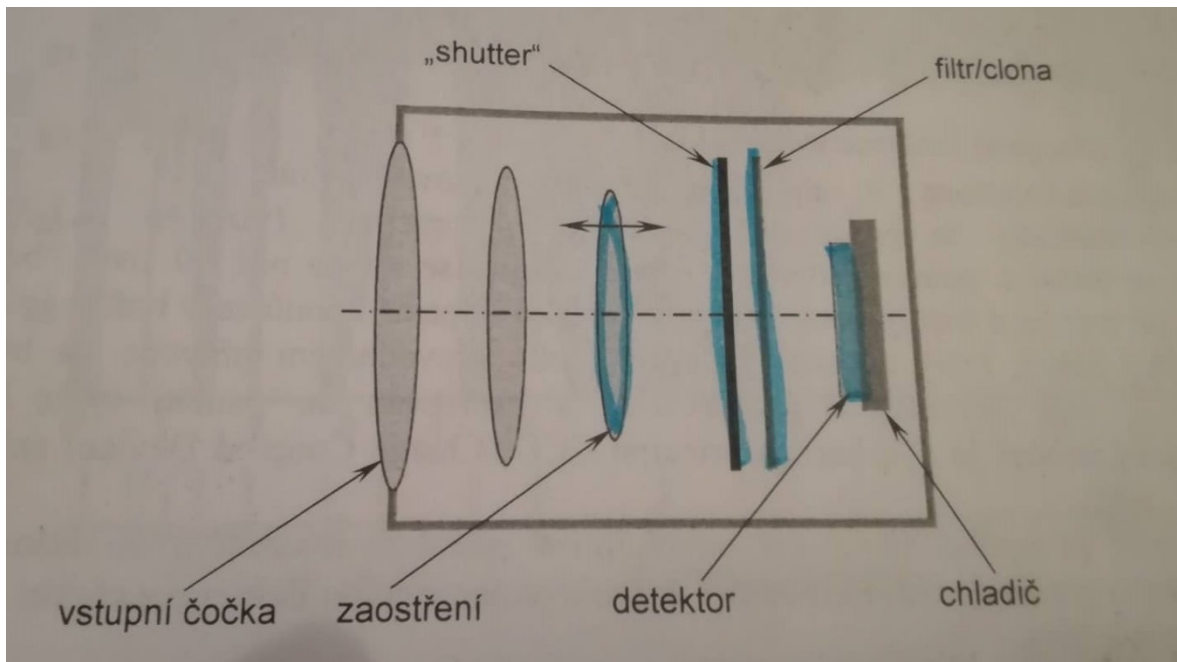
Termoelektrické teploměry jsou přístroje, které využívají pro měření teploty tzv. termoelektrického jevu. Jejím základem je obvod složený ze dvou na konci svařených vodičů z různých materiálů, jsou-li spojené konce umístěné v prostředí s různými teplotami, dochází ke vzniku elektromotorické síly. Spojené konce vložené do prostředí s měřenou teplotou, se nazývají měřicí spoje. Volné konce se označují jako porovnávací spoje, na kterých se měří napětí. [14] [15]

Označení	Materiál	Teplotní rozsah [°C]	Barevné označení
T	Cu-CuNi, Cu-ko	–200 až 350	Hnědý
J	Fe, CuNi	–200 až 750	Modrý
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	–200 až 1200	Žlutý
S	PtRh10-Pt	0 až 1600	Bílý
B	PtRh30-PtRh6	300 až 1700	

Tab. 1 Typy termočlánku [15]

3.1.3 Termovizní kamera

Termovizní systém se s postupem času neustále zdokonaloval. Od fáze rozměrných přístrojů, které byly napájeny ze sítě až k fázi nejmodernějších kamer firmy AGEMA. Na samém počátku se tato technologie využívala ve vojenské technice, s postupem času se začala uplatňovat i v různých odvětvích civilního sektoru. [14] [15]



Obr. 8 Schéma termovizní kamery [15]

Tepelné záření jako zdroj elektromagnetického zářivého toku, je klíčový v rozsahu vlnových délek $10^{-4} m$ až $10^{-7} m$. Konstrukční rozdíly mezi klasickými videokamerami a termovizními vycházejí z tepelného záření, které je vyzařováno s větší vlnovou délkou. Termovizní kamera zachycuje objektivem, který je vyroben z monokrystalu germánia, vyzářenou tepelnou energii a mění ji na elektrický signál. Tepelné záření se dostává soustavou čoček termovizní kamery na detektor tepelného záření, tam se dále přeměňuje dopadající energie na energii elektrickou. Clonou umístěnou před detektorem se může usměrňovat dopadající záření. Je-li záření příliš vysoké, zasune se před detektor šedý filtr, který má za úkol omezovat dopadající záření. [15]

3.2 Tlak

Tlak je charakterizován působící silou kolmo na plochu. Základní jednotkou je pascal (Pa). Při měření a vyhodnocování se vždy musí uvádět, zda jde o absolutní tlak, přetlak anebo podtlak. [14]

Tlak je definován vztahem:

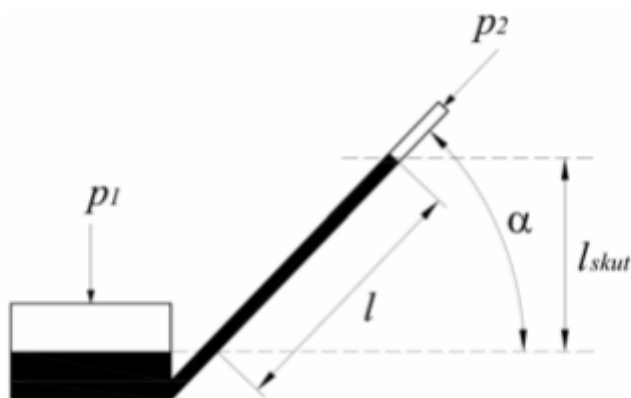
$$p = \frac{dF}{dS} \quad [Pa] \quad (3.3)$$

3.2.1 Mikromanometr

Mikromanometry jsou přístroje na měření malých tlaků. V podstatě to jsou nádobkové tlakoměry s ramenem, možným naklápět se až do svislé polohy, což umožňuje změnu citlivosti. Délky trubic mikromanometrů se vyrábějí v rozmezí 200 – 500 mm. Tekutina používaná je alkohol zabarvený metyloranží. Před měřením je důležité nastavit přístroj pomocí zabudované vodováhy do vodorovné polohy.

Mikrometry jsou vyráběny ve dvou provedeních:

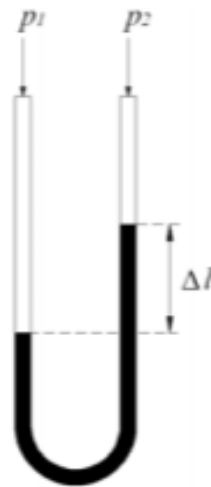
- mikrometr s pevně skloněným ramenem,
- mikrometr s nastavitelným sklonem ramene. [14]



Obr. 9 Mikromanometr [14]

3.2.2 U trubice

Trubice jsou vyráběny ve tvaru U anebo ve dvou svislých upevněných trubek, které jsou ve spodní části propojeny. Tlakoměr je naplněn asi do poloviny kapalinou. Vhodné kapaliny musí mít stálé vlastnosti, tím jsou například rtuť, destilovaná voda, etylalkohol apod. U trubice se také používá pro měření statického tlaku do hodnot 10 MPa. Na vyšší tlaky se využívají nerezové trubky se rtuťovou náplní a výška hladiny se snímá plovákem s magnetem. [14]



Obr. 10 U trubice [14]

3.2.3 Prandtlova trubice

Jedná se o dynamickou rychlostní sondu, která je umístěna v proudu vzduchu. Celkový tlak p_c (Pa) se snímá otvorem v čele sondy a statický tlak p_s (Pa) je zjišťován štěrbinami ve válcovité části sondy.



Obr. 11 Čelo prandtlovy trubice [13]

3.3 Průtok

Množství tekutiny proudící potrubím anebo otevřeným kanálem za časovou jednotku se označuje jako průtok. Označení tekutina je užívána jako název pro kapaliny, páry a plyny. Jejich společnou vlastností je právě tekutost, která je zapříčiněna snadnou vzájemnou pohyblivostí částic dané látky.

Volba nejvhodnější metody měření průtoku je závislá na následujících okolnostech:

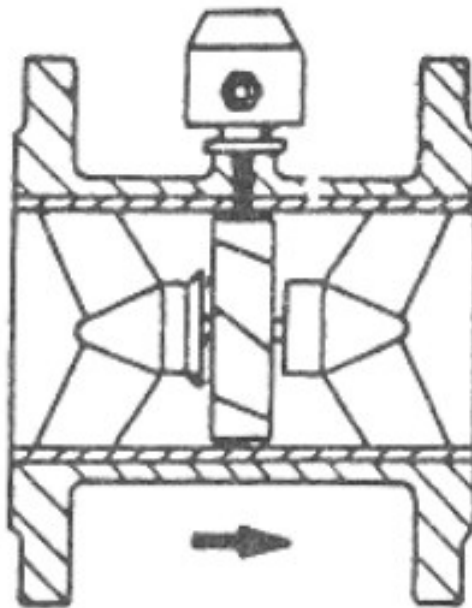
- podmínky měření (v potrubí anebo v otevřeném kanále),
- fyzikální a chemické vlastnosti protékající látky,
- tlak a teplota protékající látky,
- požadovaná přesnost měření. [14]

3.3.1 Turbínové průtokoměry

Základní částí průtokoměru je volně otočný rotor s lopatkami ve tvaru turbíny. Materiál turbíny může být buď plast (rychlost se snímá opticky) anebo kov (otáčky rotoru jsou snímány indukčně). [13]

Rotor se vlivem proudění tekutiny otáčí a jeho otáčky jsou úměrné rychlosti proudění tekutiny. Otáčky bývají zaznamenávány bezdotykovými snímači, výstupem jsou napěťové impulsy, které se dále vyhodnocují a zpracovávají. [13]

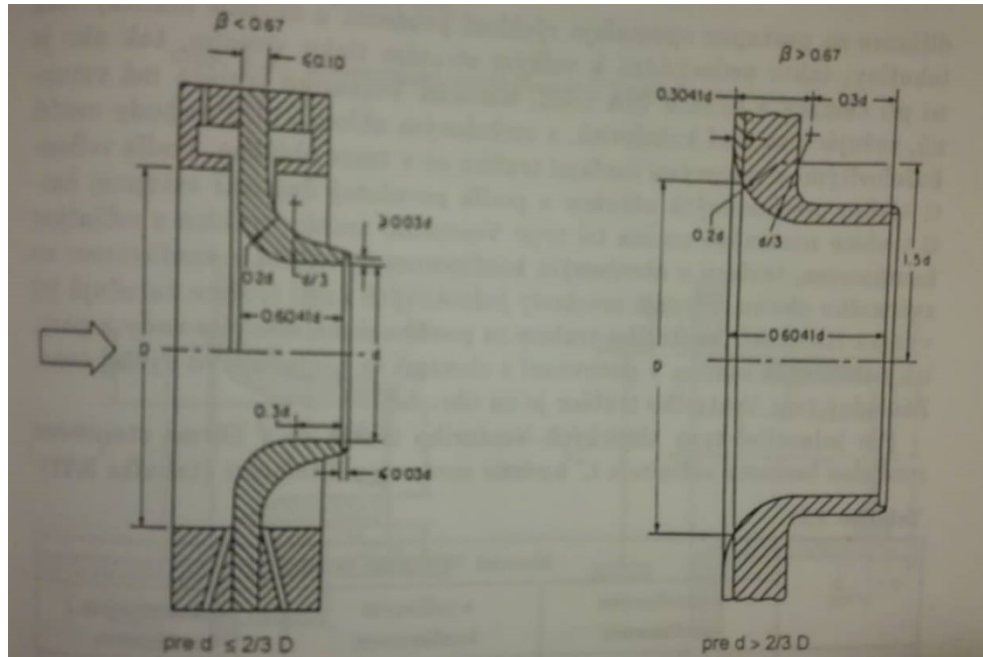
Jednou z nevýhod těchto zařízení je, že se nedají použít u tekutin s velkou viskozitou.



Obr. 12 Schéma turbínového průtokoměru [13]

3.3.2 Dýza ISA 1932

Dýza je normalizovaný škrticí orgán se zaoblenou vtokovou a válcovitou výtokovou stranou. Používá se při vysokých tlacích a teplotách (například měření napájecí vody do kotle anebo měření výstupní přehřáté páry z kotle). Její předností je velká odolnost proti opotřebení a tím dlouhá životnost.

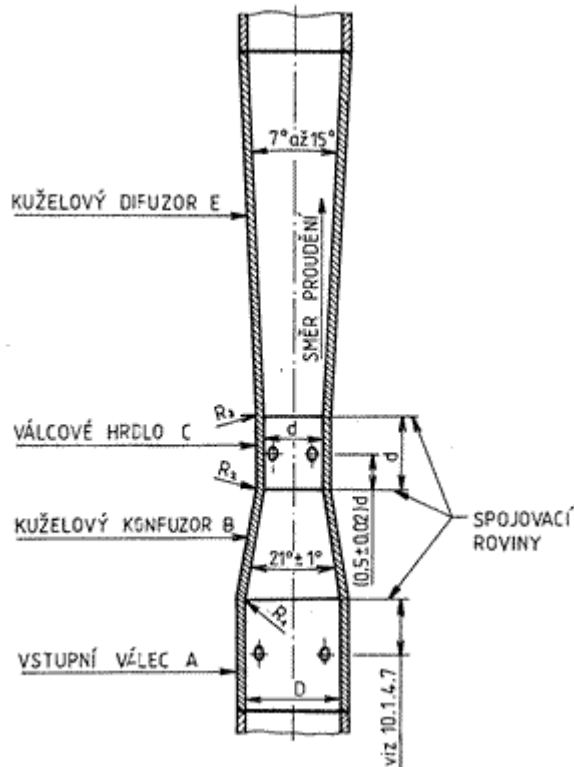


Obr. 13 Dýza ISA 1932 [14]

Norma předepisuje dva tvary vstupní části dýzy. Jak pro průměr hrdla dýzy, tak i pro válcovou část dýzy s nejmenším průměrem, platí následná podmínka: $d \leq \frac{2}{3}D$, vstupní část dýzy tvoří rovina, která plynule přechází přes dva na sebe navazující oblouky do hrdla. V druhém případě: $d > \frac{2}{3}D$, přední část se postupně zužuje od průměru D , bez rovinné plochy.

3.3.3 Klasická Venturiho trubice

Venturiho trubice se používá pro měření průtoku plynu a kapalin, kde je prvořadým požadavkem nízká tlaková ztráta. K získání malé tlakové ztráty se musí umístit kuželovitý rozšiřující difuzor za válcové hrdlo trubice. Vrcholový úhel difuzoru je volen v intervalu $7^\circ - 15^\circ$. V difuzoru se postupně zpomaluje rychlost proudění, a naopak zvyšuje statický tlak tekutiny, tím nedochází ke ztrátám tlaku vířením. Plynule přechody jednotlivých částí trubice zaručují vysokou životnost.



Obr. 14 Schéma klasické Venturiho trubice [14]

4. Výpočtová část

4.1 Charakteristika paliva

Na výpočet a měření bylo využito černé uhlí z Polského dolu Silesia, který se nachází asi 30 km od hranice s Českou republikou. Druh aplikovaného uhlí je nízkosirné s obchodním označením Ořech, jehož prvková struktura je uvedena v *Tab. 2*.

Černé uhlí Ořech	
W^r	2,4 %
A^r	5,78 %
C^r	75,814 %
H^r	4,617 %
N^r	1,378 %
S^r	0,33%
O^r	9,683 %
Q_i^r	30,53 MJ/kg

Tab. 2 Složení černého uhlí Ořech 2

Jednotlivé koeficienty stanovují stav paliva. Koeficient r (surový stav) označuje část dané složky v původním stavu, koeficient d (suchý stav) představuje bezvodý stav a koeficient h určuje část složky v hořlavině, tudíž bez obsahu vody. [17]

4.2 Přepočet stavů paliva

Na přepočet mezi jednotlivými stavy paliva byly využity následující vzorce. [17]

$$X^r = X^d \cdot (1 - W^r) \quad [-] \quad (4.1)$$

$$X^r = X^h \cdot (1 - W^r - A^r) \quad [-] \quad (4.2)$$

$$X^d = \frac{X^r}{(1 - W^r)} \quad [-] \quad (4.3)$$

$$X^h = \frac{X^r}{(1 - W^r - A^r)} \quad [-] \quad (4.4)$$

Výsledný přepočet prvkového složení paliva ve všech stavech je stanoven v *Tab. 4.3*. Vypočtené hodnoty slouží jen informativně, jelikož další výpočty se vztahují na zadaný surový vzorek paliva.

	r [–]	d [–]	h [–]
C	0,75814	0,7768	0,8257
H	0,04617	0,0473	0,05028
N	0,01378	0,0141	0,015
S	0,0033	0,00338	0,00359
O	0,09683	0,0992	0,1054
A	0,0578	0,0592	–
W	0,024	–	–

Tab. 3 Výsledné hodnoty přepočtu paliva

4.3 Stechiometrické výpočty pro spalování se vzduchem

Stechiometrické spalovací rovnice vycházejí z chemických reakčních rovnic, které vyjadřují množství kyslíku potřebného k tomu, aby došlo k jejich reakci. [17]

Výpočet je prováděn za účelem stanovení potřebného vzduchu pro spalování a současně na zjištění složení objemu spalin při spalování černého uhlí. Stanovené hodnoty jsou vztaženy na 1 kg paliva a na normální podmínky, což znamená při 0 °C a 101 325 Pa.

Nadcházející výpočtové rovnice jsou využity z [17].

- **Teoretické množství kyslíku potřebné pro spálení 1 kg paliva:**

$$V_{O_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot C^r + \frac{22,4}{32} \cdot S^r + \frac{22,4}{4} \cdot H^r - \frac{22,4}{32} \cdot O^r \quad [m_N^3/kg] \quad (4.5)$$

$$V_{O_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,75814 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,0033 + \frac{22,4}{4} \cdot 0,04617 - \frac{22,4}{32} \cdot 0,09683$$

$$V_{O_2,t} = 1,6083 \, m_N^3/kg$$

Na dokonalé spálení 1 kg paliva je zapotřebí 1,6083 m_N^3 kyslíku.

- **Teoretické množství suchého vzduchu:**

Při zastoupení objemu kyslíku ve vzduchu 21 % je teoretické množství suchého vzduchu dáno vztahem:

$$V_{vz,t}^S = \frac{V_{O_2,t,min}}{0,21} \quad [m_N^3/kg] \quad (4.6)$$

$$V_{vz,t}^S = \frac{1,6083}{0,21}$$

$$V_{vz,t}^S = 7,6586 \, m_N^3/kg$$

Z vypočteného výsledku je patrné, že na spálení 1 kg paliva se musí dodat 7,6586 m_N^3 suchého vzduchu teoretického, který je dále využit na výpočet skutečného množství suchého vzduchu.

- **Skutečné množství suchého vzduchu:**

Stanovuje se vynásobením teoretického objemu suchého vzduchu a součinitelem přebytku vzduchu α . V praxi se do spalovacího procesu dopravuje více vzduchu, aby došlo k lepšímu prohoření paliva, a tím k zmenšení ztráty nedopalem. Tohle zvětšení objemu spalovacího vzduchu určuje součinitel přebytku spalovacího vzduchu, který je pro zadaný výpočet volen $\alpha = 1,38$, hodnota je využita z materiálu [21].

$$V_{vz}^s = V_{vz,t}^s \cdot \alpha \quad [m_N^3/kg] \quad (4.7)$$

$$V_{vz}^s = 7,6586 \cdot 1,38$$

$$V_{vz}^s = 10,5689 m_N^3/kg$$

- **Teoretické množství vlhkého vzduchu**

Objem vlhkého vzduchu je určen vynásobením teoretického objemu suchého vzduchu a součinitelem zvětšení vlhkosti, který udává podíl vodní páry připadající na 1 m_N^3 suchého vzduchu. Pro obvyklé klimatické podmínky je jeho hodnota $v = 1,016$. [21]

$$V_{vz,t}^v = V_{vz,t}^s \cdot v \quad [m_N^3/kg] \quad (4.8)$$

$$V_{vz,t}^v = 7,6586 \cdot 1,016$$

$$V_{vz,t}^v = 7,781 m_N^3/kg$$

- **Skutečné množství vlhkého vzduchu**

$$V_{vz}^v = V_{vz,t}^v \cdot v \quad [m_N^3/kg] \quad (4.9)$$

$$V_{vz}^v = 10,5689 \cdot 1,016$$

$$V_{vz}^v = 10,738 m_N^3/kg$$

- **Teoretické množství suchých spalín**

$$V_{sp,t}^s = \frac{22,4}{12} \cdot C^r + \frac{22,4}{32} \cdot S^r + \frac{22,4}{28} \cdot N_2^r + 0,79 \cdot V_{vz,t}^s \quad [m_N^3/kg] \quad (4.10)$$

$$V_{sp,t}^s = \frac{22,4}{12} \cdot 0,75814 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,0033 + \frac{22,4}{4} \cdot 0,01378 + 0,79 \cdot 7,6586$$

$$V_{sp,t}^s = 7,4789 m_N^3/kg$$

Spálením 1 kg paliva vznikne 7,4789 m_N^3 suchých spalín teoretických, které jsou dále využity na výpočet množství skutečných suchých spalín.

- **Skutečné množství suchých spalin**

Skutečné množství suchých spalin jsou zvětšeny o součinitel přebytku vzduchu a lze je vypočítat ze vztahu.

$$V_{sp}^s = V_{sp,t}^s + (\alpha - 1) \cdot V_{vz,t}^s \quad [m_N^3/kg] \quad (4.11)$$

$$V_{sp}^s = 7,4789 + (1,38 - 1) \cdot 7,6586$$

$$V_{sp}^s = 10,3892 \text{ } m_N^3/kg$$

Při spálení 1 kg paliva se vyprodukuje 10,3892 m_N^3 suchých spalin skutečných.

- **Množství vodní páry ve spalinách**

Vodní pára ve spalinách je tvořena odpařením vlhkosti z paliva, vodní párou ze spalování vodíku a rozdílu vlhkého vzduchu se suchým vzduchem.

$$V_{H_2O} = (V_{vz}^v - V_{vz}^s) + \frac{44,8}{36} \cdot W^r + \frac{44,8}{4} \cdot H^r \quad [m_N^3/kg] \quad (4.12)$$

$$V_{H_2O} = (10,738 - 10,5689) + \frac{44,8}{36} \cdot 0,024 + \frac{44,8}{4} \cdot 0,04617$$

$$V_{H_2O} = 0,71607 \text{ } m_N^3/kg$$

Spálením 1 kg paliva vznikne 0,71607 m_N^3 vodní páry ve spalinách.

- **Skutečné množství vlhkých spalin**

Vlhké spaliny jsou dány součtem skutečných suchých spalin a vodní párou ve spalinách.

$$V_{sp}^v = V_{sp}^s + V_{H_2O} \quad [m_N^3/kg] \quad (4.13)$$

$$V_{sp}^v = 10,3892 + 0,71607$$

$$V_{sp}^v = 11,1053 \text{ } m_N^3/kg$$

- **Složení suchých spalin**

Suché spaliny jsou tvořeny oxidem uhličitým, oxidem siřičitým, dusíkem a kyslíkem. Výsledné hodnoty jsou udávány v % a po jejich sečtení výsledné číslo musí být 100 %.

Měrný podíl oxidu uhličitého v suchých spalinách.

$$X_{CO_2} = \frac{\frac{22,4}{12} \cdot C^r}{V_{sp}^s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.14)$$

$$X_{CO_2} = \frac{\frac{22,4}{12} \cdot 0,75814}{10,3892} \cdot 100$$

$$X_{CO_2} = 13,62 \%$$

Z vypočteného výsledku lze stanovit, že oxid uhličitý je zastoupen v suchých spalínách 13,62 %.

Měrný podíl oxidu siřičitého v suchých spalínách.

$$X_{SO_2} = \frac{\frac{22,4}{32} \cdot S^r}{V_{sp}^s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.15)$$

$$X_{SO_2} = \frac{\frac{22,4}{32} \cdot 0,0033}{10,3892} \cdot 100$$

$$X_{SO_2} = 0,022 \%$$

Oxid siřičitý ve spalínách je zastoupen 0,022 %.

Měrný podíl dusíku v suchých spalínách.

$$X_{N_2} = \frac{\frac{22,4}{28} N_2^r + 0,79 \cdot V_{vz}^s}{V_{sp}^s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.16)$$

$$X_{N_2} = \frac{\frac{22,4}{28} \cdot 0,01378 + 0,79 \cdot 10,5689}{10,3892} \cdot 100$$

$$X_{N_2} = 80,4726 \%$$

Z vypočteného výsledku je patrné, že největší zastoupení ve spalínách má dusík a to 80,4726 %.

Měrný podíl kyslíku v suchých spalínách.

$$X_{O_2} = \frac{0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{vz,t}^s}{V_{sp}^s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.17)$$

$$X_{O_2} = \frac{0,21 \cdot (1,38 - 1) \cdot 7,6586}{10,3892} \cdot 100$$

$$X_{O_2} = 5,8854 \%$$

Kyslík ve spalínách má zastoupení 5,8854 %.

• Složení vlhkých spalin

Složení vlhkých spalin je téměř totožné se suchými spalínami, jen navýšeny o vodní páru.

Měrný podíl oxidu uhličitého ve vlhkých spalínách.

$$X_{CO_2} = \frac{\frac{22,4}{12} \cdot C^r}{V_{sp}^v} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.18)$$

$$X_{CO_2} = \frac{\frac{22,4}{12} \cdot 0,75814}{11,1053} \cdot 100$$

$$X_{CO_2} = 12,743 \%$$

Z vypočteného výsledku lze stanovit, že oxid uhličitý je zastoupen v suchých spalínách 12,743 %.

Měrný podíl oxidu siřičitého ve vlhkých spalínách.

$$X_{SO_2} = \frac{\frac{22,4}{32} S^r}{V_{sp}^v} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.19)$$

$$X_{SO_2} = \frac{\frac{22,4}{32} 0,0033}{11,1053} \cdot 100$$

$$X_{SO_2} = 0,0208 \%$$

Oxid siřičitý ve spalínách je zastoupen 0,0208 %.

Měrný podíl dusíku ve vlhkých spalínách.

$$X_{N_2} = \frac{\frac{22,4}{28} N_2^r + 0,79 \cdot V_{vz}^S}{V_{sp}^v} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.20)$$

$$X_{N_2} = \frac{\frac{22,4}{28} 0,01378 + 0,79 \cdot 10,5689}{11,1053} \cdot 100$$

$$X_{N_2} = 75,283 \%$$

Z vypočteného výsledku je patrné, že největší zastoupení ve spalínách má dusík a to 75,283 %.

Měrný podíl vodní páry ve vlhkých spalínách.

$$X_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{sp}^v} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.21)$$

$$X_{H_2O} = \frac{0,71607}{11,1053} \cdot 100$$

$$X_{H_2O} = 6,448 \%$$

Vodní pára ve spalínách má zastoupení 6,448 %.

Měrný podíl kyslíku ve vlhkých spalínách.

$$X_{O_2} = \frac{0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{vz,t}^S}{V_{sp}^v} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.22)$$

$$X_{O_2} = \frac{0,21 \cdot (1,38 - 1) \cdot 7,6586}{11,1053} \cdot 100$$

$$X_{O_2} = 5,5052 \%$$

Kyslík ve spalínách je zastoupen 5,5052 %.

4.4 Přepočet z normálního stavu na reálný stav

Na ověření vypočtených a naměřených hodnot je přepočet velmi důležitý, jelikož předešlé vypočtené výsledky jsou uvedeny za normálních podmínek ($T = 0\text{ °C}$, $p = 101\,325\text{ Pa}$). Experimentální část je uváděna za podmínek ($T_1 = 800\text{ °C}$, $p_1 = 101\,400\text{ Pa}$). Na přepočet mezi stavy poslouží stavová rovnice [17].

$$\frac{p \cdot V}{T} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} \quad [-] \quad (4.23)$$

po úpravě

$$V_1 = \frac{p \cdot V \cdot T_1}{T \cdot p_1}$$

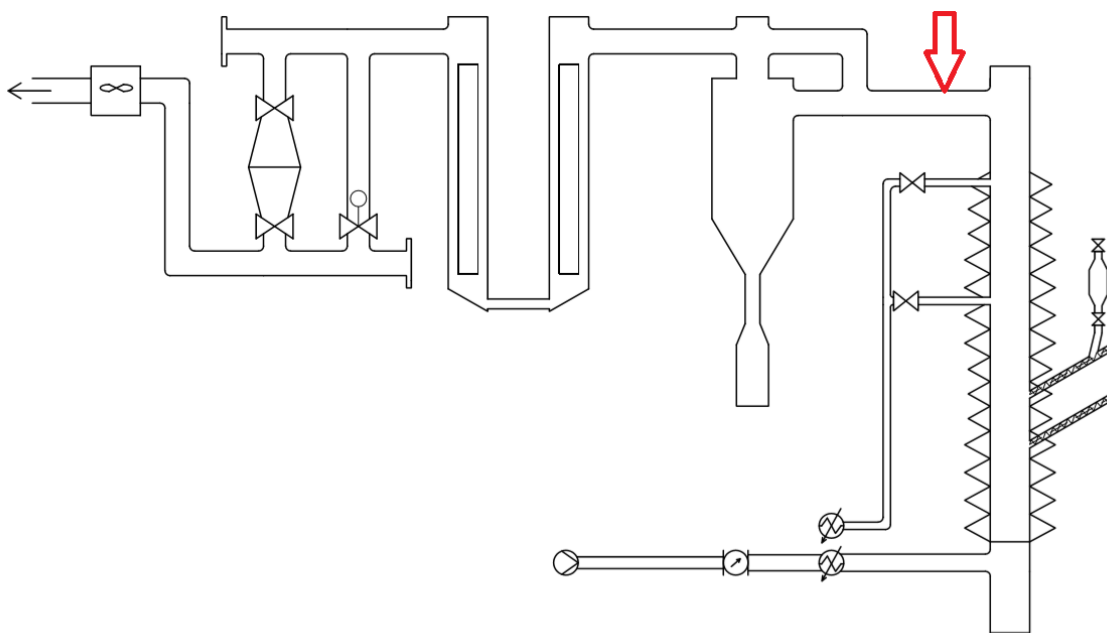
	Normální stav	Reálný stav
$V_{o2,t}$	$1,6083\text{ m}_N^3/\text{kg}$	$6,3166\text{ m}^3/\text{kg}$
$V_{vz,t}^s$	$7,6586\text{ m}_N^3/\text{kg}$	$30,0791\text{ m}^3/\text{kg}$
V_{vz}^s	$10,5689\text{ m}_N^3/\text{kg}$	$41,5093\text{ m}^3/\text{kg}$
$V_{vz,t}^v$	$7,781\text{ m}_N^3/\text{kg}$	$30,5598\text{ m}^3/\text{kg}$
V_{vz}^v	$10,738\text{ m}_N^3/\text{kg}$	$42,1735\text{ m}^3/\text{kg}$
$V_{sp,t}^s$	$7,4789\text{ m}_N^3/\text{kg}$	$29,3733\text{ m}^3/\text{kg}$
V_{sp}^s	$10,3892\text{ m}_N^3/\text{kg}$	$40,8035\text{ m}^3/\text{kg}$
V_{H_2O}	$0,71607\text{ m}_N^3/\text{kg}$	$2,8123\text{ m}^3/\text{kg}$
V_{sp}^v	$11,1053\text{ m}_N^3/\text{kg}$	$43,616\text{ m}^3/\text{kg}$

Tab. 4 Výsledné hodnoty jednotlivých stavů

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Popis laboratorního zařízení

Měření bylo prováděno na experimentálním spalovacím zařízení se stacionární fluidní vrstvou. Schéma zařízení, které bylo vytvořeno v programu AutoCAD 2019, je uvedeno na obr. 17.



Obr. 15 Schéma experimentálního spalovacího zařízení

Mechanismus se skládá se samostatné spalovací komory se stacionární fluidní vrstvou. Doprava paliva do spalovací komory ze zásobníku je zajištěna šnekovým dopravníkem. Primární vzduch je dopravován pomocí dmychadla přes průtokoměr a ohřívač vzduchu. Spaliny jsou dále vedeny ze spalovací komory do cyklonu, kde se odlučují tuhé částice. Z cyklonu jsou spaliny přiváděny do výměníku, který je navržen na bázi voda-spaliny a je zde využito vyprodukované teplo ze spalovacího zařízení. Z výměníku jsou ochlazené spaliny vedeny přes spalinový ventilátor do komínu.

5.2 Popis experimentu

Než se dostaneme k samotnému popisu měření, je třeba si přiblížit analyzační box TESTO 350. Analyzátor slouží pro měření koncentrací vybraných složek ve spalínách. V praxi vyhovuje veškerým požadavkům jako je snadná manipulace a použití pro tuhá, kapalná a plynná paliva.



Obr. 16 Analyzátor spalín TESTO 350 [22]

Mechanismus zahrnuje řídicí centrálu, která řídí analyzační box a ukládá naměřené hodnoty. Ruční přístroj se dá vytáhnout z kufru pro analýzu spalín. Mohutné pouzdro chrání veškerou senzorku a vyhodnocovací paměťovou elektroniku před možným poškozením. TESTO 350 je dále vybaven prachovým senzorem, což umožňuje zobrazovat hodnoty prachu v reálném čase a tím je zajištěno sledování každého zásahu na kotli. [22]

Měřicí rozsah	0 – 300 mg/m ³
Rozlišení	0,1 mg/m ³
Paměť	500 000 naměřených hodnot
Provozní teplota	5 – 40 °C
Hmotnost	7,9 kg
Rozměr	475 · 360 · 190 mm

Tab. 5 Technické parametry TESTO 350 [22]

Analyzátor spalín TESTO 350 může být osazen až šesti senzory. Z toho je pět senzorů volitelných, mezi kterými lze libovolně vybírat. [22]

Měřená složka	Měřicí rozsah senzorů	Přesnost	Měřítko	Doba odezvy
O_2	0 až 25 Obj. %	$\pm 0,8$ (0 až 25 Obj. % O_2)	0,01 Obj. % O_2	20 s
CO	0 až 10000 ppm	± 5 % (200 až 2000 ppm) ± 10 % (2001 až 10000 ppm) ± 10 ppm (0 až 199 ppm)	1 ppm (0 až 10000 ppm)	40 s
NO	0 až 4000 ppm	± 5 % (100 až 1999 ppm) ± 10 % (2000 až 4000 ppm) ± 5 ppm (0 až 99 ppm)	1 ppm (0 až 4000 ppm)	30 s
NO_2	0 až 500 ppm	± 5 % (100 až 500 ppm) ± 5 ppm (0 až 99,9 ppm)	0,1 ppm (0 až 500 ppm)	40 s
SO_2	0 až 5000 ppm	± 5 % (100 až 2000 ppm) ± 10 % (2001 až 5000 ppm) ± 5 ppm (0 až 99 ppm)	1 ppm (0 až 5000 ppm)	30 s
CO_2	0 až 50 Obj. %	$\pm 0,3$ Obj. % CO_2 + 1% z mv (0 až 25 Obj. % CO_2) $\pm 0,5$ Obj. % CO_2 + 1,5% z mv (> 25 až 50 Obj. % CO_2)	0,01 Obj. % (0 až 25 Obj. %) 0,1 Obj. % (> 25 Obj. %)	10 s

Tab. 6 Technické specifikace analyzačního boxu Testo 350 [22]

Pro odběr spalin je analyzační box vybaven modulární odběrovou sondou. [23]

Hmotnost	606 g
Délka trubice sondy	335 mm
Délka kabelu	2,2 m
Průměr sondy	8 mm
Maximální teplota	1000 °C

Tab. 7 Technické specifikace modulární odběrové sondy [23]

Na začátku měření je nutno zkontrolovat kvalitu materiálu fluidní vrstvy a vyčistit cyklón. Analyzátor spalin před použitím je třeba zkalibrovat kalibračním plynem. Následuje předeřívání spalovacího prostoru, kde bude využit elektrický ohřev primárního vzduchu. Po získání požadované teploty na vznícení paliva se zahájí dávkování paliva pomocí šnekového dopravníku. Dále je třeba docílit zvětšením průtoku paliva teploty okolo 750 °C. Teploty jsou měřeny po výšce spalovací komory pomocí termočlánku.

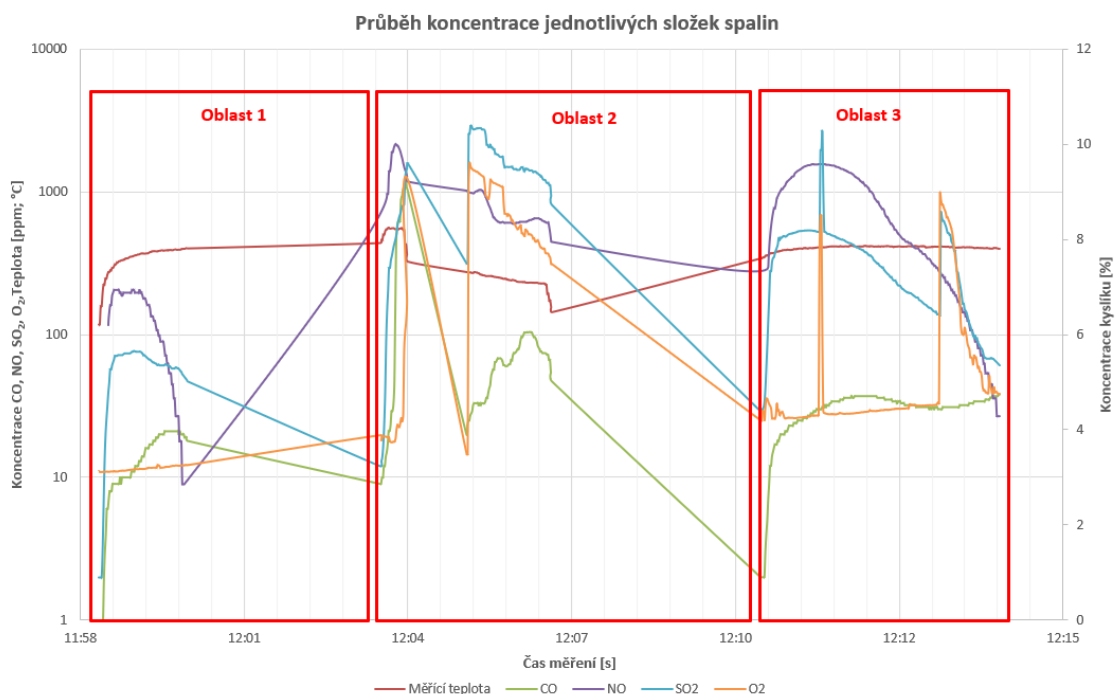
Cílem samotného experimentu je naměření koncentrace O_2 , NO , NO_2 , SO_2 a CO ve spalinách.

Teplota v měřicím bodě	370 °C
Teplota spalování	750 – 900°C
Teplota okolního vzduchu	28 °C
Průtok spalin přístrojem	$1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
Relativní tlak v místě spalování	101 400 Pa
Hmotnostní příkon paliva	$1,2 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$

Tab. 8 Informační hodnoty v průběhu měření

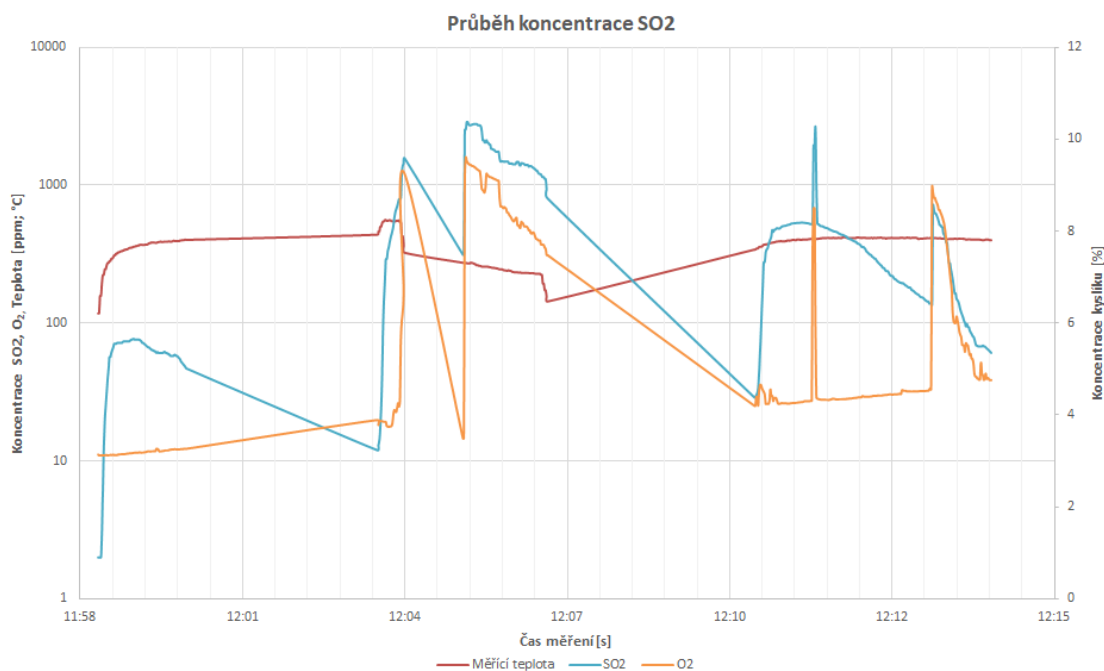
5.3 Vyhodnocení experimentu

Sonda byla umístěna do měřicího místa (viz Obr.15) v čase 11:58:54 a byla ponechána v proudu spalin až do času 12:14:43. Zápis hodnot se uváděl po 1 sekundě. Graf 1 byl rozdělen do tří oblastí. V „Oblasti 1“ bylo přes šnekový podavač dopraveno pouze 10 g paliva. O čemž vypovídají křivky jednotlivých koncentrací znázorněné na grafu 1 (Oblast 1). Poté bylo do reaktoru dopravováno 50 g paliva, což lze zaznamenat na grafu v „Oblasti 2“, kdy skokově vzrostly koncentrace jednotlivých složek, až na mírný pokles v čase od 12:04 do 12:05, což mohlo být způsobeno nepravidelným dávkováním paliva přes šnekový dopravník. V „Oblasti 3“ bylo opět dávkováno 50 g paliva, a i zde je viditelný skokový nárůst koncentrací jednotlivých složek v objemu spalin. V grafu 1 není znázorněn průběh koncentrace CO_2 , jelikož nedisponujeme měřícím senzorem CO_2 .



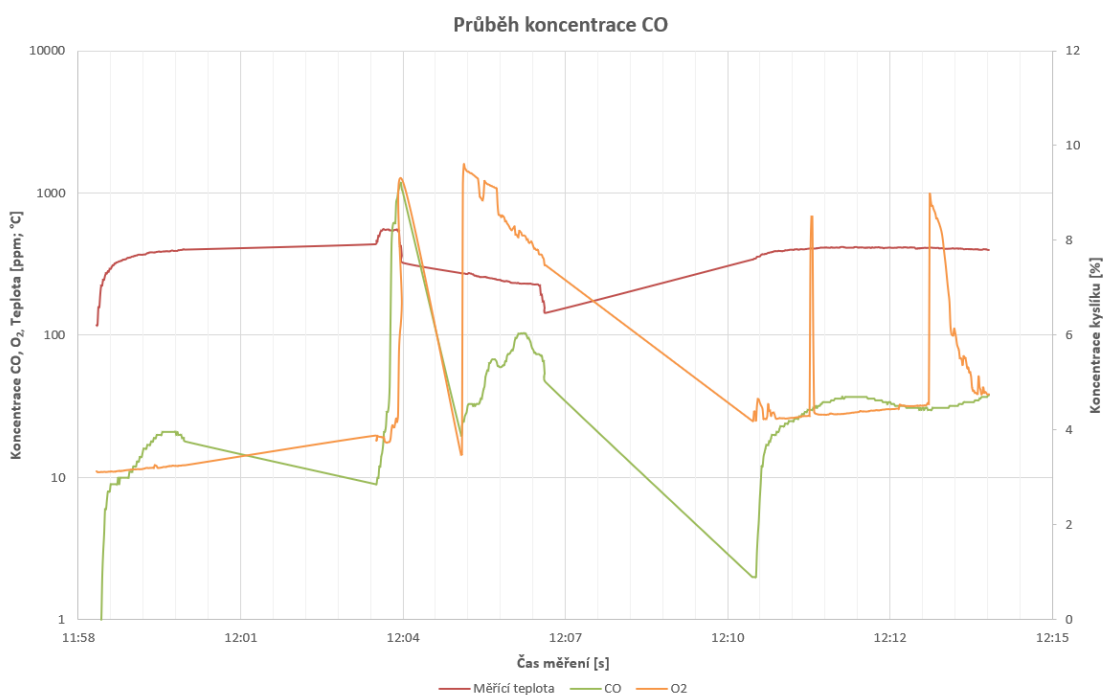
Graf 1 Průběh koncentrace jednotlivých složek spalin

Z grafu 2 lze vypočítat patrnou závislost obsahu kyslíku ve spalinách na koncentraci SO_2 , kdy se vzrůstající koncentrací O_2 roste koncentrace SO_2 . Teplota v průběhu měření osciluje kolem teploty 370 °C. Teplota v bodě měření neovlivňuje naměřené hodnoty, jelikož samotný proces spalování probíhal za teplot 750 – 900 °C. Maximální hodnota SO_2 , která byla naměřena je rovna 2800 ppm.



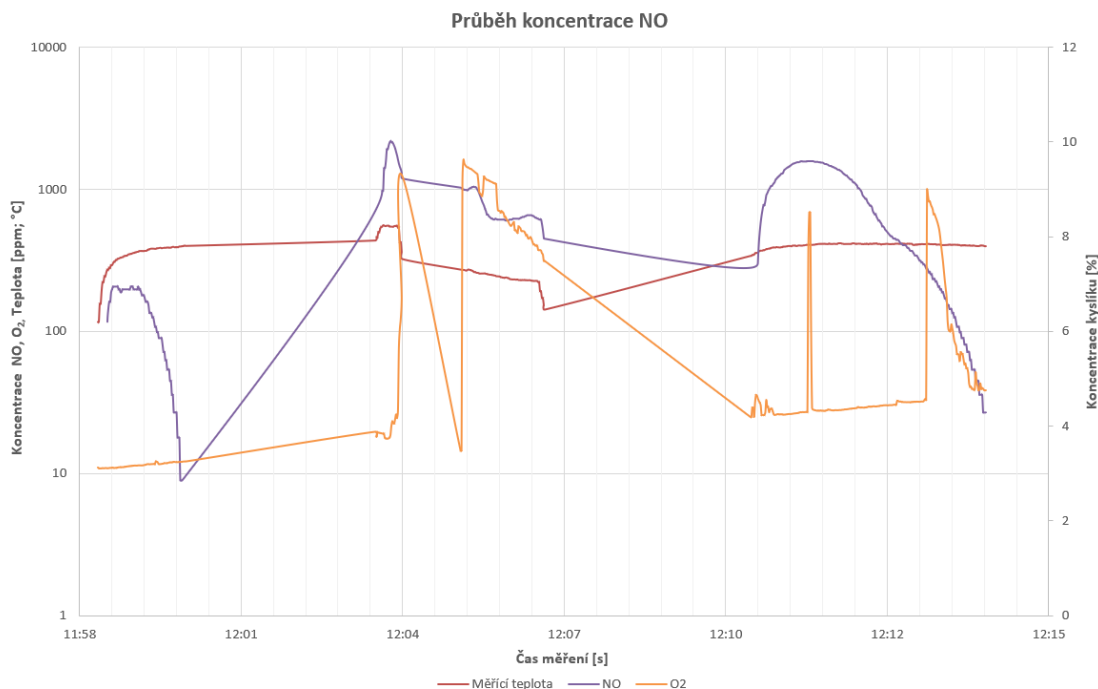
Graf 2 Průběh koncentrace SO_2

Množství CO ve spalinách není příliš vysoké, a to hlavně z důvodu výšky fluidního reaktoru, který umožňuje skoro dokonale dopálení veškerého CO , vzniklého z procesu spalování. Maximální hodnota, která byla naměřena, je rovna 1189 *ppm*. Z grafu 3 lze vyčíst, že CO není nějak patrně závislé na koncentraci O_2 , jen v čase 12:03 až 12:05 byl zaznamenán prudký nárůst obou složek. Průměrná hodnota CO z celého měření je uvedena v Tab.8.



Graf 3 Průběh koncentrace CO

Z grafu 4 je patrné, že množství koncentrace NO skokově narůstalo při dávkování paliva v jednotlivých oblastech.



Graf 4 Průběh koncentrace NO

Maximální hodnota NO byla 2178 ppm. Zastoupení NO_x činilo 648,8 ppm, z čehož 648,7 ppm tvořil NO a nepatrný zbytek NO_2 .

Složka	O_2 [%]	CO [ppm]	NO [ppm]	NO_2 [ppm]	SO_2 [ppm]
Zastoupení	5,2	56,3	648,7	0,1	565,5

Tab. 9 Průměrné objemové zastoupení složek z celého měření

Z měření byly vytvořeny dvě tabulky (Tab. 9 a Tab. 10). Při porovnání obou tabulek si lze všimnout, že v Tab. 10, kde jsou zahrnuty průměrné hodnoty složek v čase přímého spalování, které vycházejí mnohem větší než hodnoty z průměrného zastoupení složek z celého měření. Důvodem je nezahrnutí hodnot do průměrného zastoupení složek v místě, kde nedochází ke spalování, ale spaliny stále proudí do analyzátoru nebo dochází ke spalování zbytků.

Složka	O_2 [%]	CO [ppm]	NO [ppm]	NO_2 [ppm]	SO_2 [ppm]
Zastoupení	5,14	66	910	0,5	742

Tab. 10 Průměrné objemové zastoupení složek v čase přímého spalování

Z uvedeného experimentu vyplývá, že průběh jednotlivých složek spalin skokově narůstal jen při dávkování paliva, ale po určitém čase se ustálil. Při výpočtu průměrných hodnot jednotlivých složek spalin vyšly velmi nízká čísla, což dokazuje, že laboratorní zařízení je z hlediska provozu vhodné.

6. ZÁVĚR

V současné době se klade, čím dál větší důraz na účinnost spalovacích zařízení a jejich dopad na životní prostředí. Hlavním cílem této bakalářské práce bylo přiblížit fluidní spalování. Provést stechiometrické výpočty spalování pro zjištění podílu jednotlivých složek spalin. Tyto hodnoty dále ověřit s provedeným měřením na laboratorním experimentálním zařízení.

Teoretická část bakalářské práce se věnovala popisem fluidní vrstvy, typy fluidních vrstev a teplotou fluidní vrstvy. V podkapitole č. 2.6 bylo popsáno rozdělení fluidních kotlů, jejichž konstrukční provedení úzce závisí na účelu, za jakým byl daný kotel realizován. Základní rozdělení fluidních kotlů z hlediska charakteristiky fluidní vrstvy je fluidní kotel se stacionární fluidní vrstvou, s expandující fluidní vrstvou a s cirkulující fluidní vrstvou. Dále byly popsány výhody a nevýhody fluidního spalování. Kapitola č. 3 se zaměřovala na popis diagnostického měření, kde byly definovány základní principy měření tlaku, teploty a průtoku. Diagnostická měření jsou využívány k získání potřebných hodnot, které lze dále využít při výpočtech potřebných pro hodnocení garantovaných parametrů.

Nejdůležitější část předložené práce začíná kapitolou č. 4, kde byla popsána charakteristika paliva (černé uhlí) použitého při stechiometrickém výpočtu spalování a experimentálním měření. Černé uhlí pochází z Polského dolu Silesia, jehož prvkové složení je uvedeno v Tab. 2. Za pomoci stechiometrických výpočtů spalování byly stanoveny koncentrace kyslíku, vzduchu a spalin. Cílem výpočtu bylo zjistit složení vlhkých a suchý spalin při spalování černého uhlí. Výpočtem bylo zjištěno, že zastoupení jednotlivých složek spalin činí $CO_2 = 12,743 \%$, $SO_2 = 0,0208 \%$, $N_2 = 75,283 \%$, $H_2O = 6,448 \%$, $O_2 = 5,5052 \%$. Uvedené výsledné hodnoty jsou vztaženy na vlhké spaliny. V neposlední řadě byly výsledné hodnoty převedeny z normálního stavu ($T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$, $p = 101\,325 \text{ Pa}$) na reálný stav, jelikož spalování probíhá za teploty $800 \text{ } ^\circ\text{C}$ a relativním tlaku $101\,400 \text{ Pa}$, na přepočtení mezi stavy byla využita stavová rovnice.

Experimentální část se věnovala popisu laboratorního zařízení se stacionární fluidní vrstvou, na kterém proběhlo měření. V příloze je doloženo schéma laboratorního zařízení, které bylo vytvořeno v programu AutoCAD 2019. Dále se tato část zaměřovala na průběh měření, kde je shrnuta příprava experimentálního spalovacího zařízení před zahájením měření. Detailně je zde i popsán analyzátor spalin TESTO 350, který v praxi slouží pro měření koncentrací vybraných složek ve spalinách. Analyzátor spalin může obsahovat až šest senzorů, které mohou měřit složky O_2 , CO_2 , SO_2 , NO_2 , NO a CO . Podkapitola č. 5.3 obsahuje vyhodnocená data z měření. Z naměřených hodnot byl vytvořen graf, který obsahuje průběh koncentrace všech měřených složek O_2 , SO_2 , NO a CO . Graf byl dále

rozdělen do tří částí podle dávkování jednotlivého množství paliva. Z grafu je patrné, že při dávkování jednotlivého množství paliva, byl zaznamenán prudký nárůst koncentrací jednotlivých složek v objemu spalin. Lze také vypořádat patrnou závislost obsahu kyslíku ve spalinách na koncentraci SO_2 , kdy se vzrůstající koncentrací O_2 roste koncentrace SO_2 . Také můžeme konstatovat, že množství CO ve spalinách není příliš vysoké, a to hlavně z důvodu výšky fluidního reaktoru, který umožňuje skoro dokonalé dopálení veškerého CO , vzniklého z procesu spalování. Průměrná hodnota koncentrace CO se pohybovala kolem 56,3 ppm. V neposlední řadě byly vytvořeny z naměřených hodnot dvě tabulky, a to průměrné objemové zastoupení složek z celého měření a průměrné objemové zastoupení složek v čase přímého spalování, které byly mezi sebou porovnány. V tabulce objemové zastoupení složek v čase přímého spalování vyšly mnohem větší čísla z důvodu nezahrnutí hodnot v místě, kde nedochází ke spalování.

Poděkování

Tímto bych rád vyjádřil své díky za pomoc a poskytnuté konzultace vedoucímu své práce Ing. Markovi Jadlovcovi. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu v době psaní práce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] KUNII, D. LEVENSPIEL, O. *Fluidization Engineering*. 2. vydání. Howard Brenner Massachusetts institute of Technology: Butterworth-Heinemann, 1991. 522 s. ISBN 0-409-90233-0. [cit. 2019-9-5]

[2] ČECH, B. *Fluidní spalovací zařízení v energetice: Fluidized bed combustion devices in energetics* : teze habilitační přednášky. VŠB - Technická univerzita Ostrava Fakulta strojní. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2011. ISBN 978-80-248-2490-1. [cit. 2019-9-5]

[3] MÍCHAL, V. *Fluidní spalování*. [online]. První česká multimediální encyklopedie energie, Praha 1999. [cit. 2019-09-10]

Dostupné z:

http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=2&slovník_page=fluid_spal.html

[4] DURDA, T. *Fluidní spalování uhlí a alternativních paliv*. [online]. Příspěvky z konference Bažantova konference doktorandů 2013, Praha 2013. [cit. 2019-09-14]

Dostupné z: <http://invenio.nusl.cz/record/155869/files/content.csg.pdf>

[5] HARTMAN, M. SVOBODA, K. TRNKA, O. BERAN, Z. *Reaktory s cirkulující fluidní vrstvou*. Chemické listy 93 - Referáty. Praha: Ústav chemických procesů, Akademie věd České republiky. 1999. str. 788 – 793. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/1999_12_788-793.pdf

[6] *Využití sorbentů ve fluidní vrstvě* [online]. , 21 [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/_files/projekty/enazp/09/MMP/176_Sorbenty-Nemcek.pdf

[7] SCHREIBEROVÁ, Lenka. *8 Fluidace* [online]. , 1-9 [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/labchi/Fl.pdf>

[8] VALENTOVA. *Fluidace* [online]. , 1-6 [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: http://www.mssch.cz/sites/default/files/_uzivatele/valentova/Fluidace.pdf

[9] PROŠKA, O. *Realizace a modelování prototypu „popkornového“ fluidního zařízení*. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní katedra energetiky, 2013. str. 3-15. Vedoucí diplomové práce prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc. [cit. 2019-11-5].

- [10] JADLOVEC, M. *Návrh prototypového zařízení pro výzkum spalování paliv ve fluidní vrstvě a snižování emisí těžkých kovů*. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní katedra energetiky, 2018. str. 9-22. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D. [cit. 2019-11-12].
- [11] OKA, S. N. ANTHONY, E. J. *Fluidized Bed Combustion. 1. Vydání*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004. 580 s. ISBN 0-8247-4699-6. [cit. 2019-11-18].
- [12] ANDREOVSKÝ, J. *Spalování paliv - Kotle*. Ekomonitor.cz [online]. [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/obrazky/seminare/ovzdusi/seminar2/10_dil_5_b_tisk_andreovsky.pdf
- [13] FORMÁNEK, J. *Podklady k principu měření rychlosti a rychlosti proudění*. Home.zcu.cz [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/mmvyuka/Data/ivk-mt-soubory/12-F.pdf>
- [14] RAJNIAK, I. *Tepelnoenergetické a emisné merania*. Bratislava: Ister Science, 1997. ISBN 80-88683-20-3. [cit. 2019-11-20]
- [15] ČECH, B. Kadlec, Z. *Měření teplot v energetice*. VŠB - Technická univerzita Ostrava Fakulta strojní. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2008. ISBN 978-80-248-1861-0 [cit. 2019-11-24]
- [16] [online]. 2013 [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/10762394-Monitorovaci-system-odporovy-teplomer-pt100-cpkn-cpkno-cpkn-chs-hpk-hpk-l-megacpk-rph-doplňkový-navod-k-obsluze.html>
- [17] LOO, Sjaak van a Jaap KOPPEJAN, ed. *Handbook of biomass combustion and co-firing*. London: Earthscan, 2008. ISBN 978-1-84407-249-1. [cit. 2020-02-26]
- [18] NOVOTNÝ, P. a Ludvík F. *Spalování paliv a odpadů ve fluidní vrstvě*. Praha: SNTL, 1977. [cit. 2020-03-05]
- [19] BALÁŠ, M. a LISÝ, M. *Kotle – 2. část. Tzbinfo* [online]. 2012, 2.4.2012 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
- [20] MACHÁČEK, S. *Kotle pro spalování pevných paliv*. Slideserve [online]. [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/sopoline-vance/kotle-pro-spalov-n-pevn-ch-paliv>
- [21] POLACH, V. *Parní kotle* [online]. Plzeň [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/005_Parn-kotle---Polach---P0.pdf

[22] Testo [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.testo.com/cz-CZ/testo-350/p/0632-3510>

[23] Testo [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: https://www.testo.com/cz-CZ/modularni-odberova-sonda-delka-335-mm-tmax-1000-degc-o-8-mm/p/0600-8764?fbclid=IwAR0aKvOPvg5RORrBZ2xAf62LO858-oq901mndpAZ2_UZS-wlKsr-IPVzk3Y

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Rozsah použitelnosti jednotlivých typů ohnišť [20]	11
Obr. 2 Vlastnosti fluidní vrstvy s reálnou kapalinou [1]	12
Obr. 3 Rozdělení fluidních vrstev [1]	13
Obrázek 4 Fluidní kotel typu IGNIFLUID [2]	16
Obr. 5 Fluidní kotel typu DUKLAFLUID [2]	17
Obr. 6 Cirkulující kotel K12 v ENERGETICE Třinec [2]	18
Obr. 7 Odporový teploměr PT100 [15]	20
Obr. 8 Schéma termovizní kamery [15]	22
Obr. 9 Mikromanometr [14]	23
Obr. 10 U trubice [14]	24
Obr. 11 Čelo prandtlovy trubice [13]	24
Obr. 12 Schéma turbínového průtokoměru [13]	25
Obr. 13 Dýza ISA 1932 [14]	26
Obr. 14 Schéma klasické Venturiho trubice [14]	27
Obr. 15 Schéma experimentálního spalovacího zařízení	35
Obr. 16 Analyzátor spalin TESTO 350 [22]	36

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Typy termočlánku [15]	21
Tab. 2 Složení černého uhlí Ořech 2	28
Tab. 3 Výsledné hodnoty přepočtu paliva	29
Tab. 4 Výsledné hodnoty jednotlivých stavů	34
Tab. 5 Technické parametry TESTO 350 [22]	36
Tab. 6 Technické specifikace analyzačního boxu Testo 350 [22]	37
Tab. 7 Technické specifikace modulární odběrové sondy [23]	38

Tab. 8 Informační hodnoty v průběhu měření.....	38
Tab. 9 Průměrné objemové zastoupení složek z celého měření.....	41
Tab. 10 Průměrné objemové zastoupení složek v čase přímého spalování	41

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Průběh koncentrace jednotlivých složek spalin	39
Graf 2 Průběh koncentrace SO_2	40
Graf 3 Průběh koncentrace CO	40
Graf 4 Průběh koncentrace NO	41

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Schéma laboratorního zařízení

Příloha č. 2 Kusovník